



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

AURINKOKENNOTEKNOLOGIAT JA NIIDEN KIERRÄTYS

Maria Nyman

YMPÄRISTÖTEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Kandidaatintyö

Joulukuu 2019

TIIVISTELMÄ

Aurinkokennoteknologiat ja niiden kierrätys

Maria Nyman

Oulun yliopisto, Ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2019, 37s.

Työn ohjaaja yliopistolla: TkT Jenni Ylä-Mella

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli kartoittaa tämänhetkisiä aurinkoenergian käyttömääriä, yleisimpiä ja kehitteillä olevia aurinkokennoteknologioita sekä niiden kierrätysmenetelmiä.

Työssä lähestytään aihetta EU:n ympäristöpolitiikan näkökulmasta, jossa ilmastonmuutos toimii yhtenä ajavana voimana aurinkoenergian käytön lisääntymiselle. EU:n määräämän uusiutuvan energian direktiivin tarkoituksena on lisätä uusiutuvan energian käyttöä muun muassa sähköntuotannossa. EU on myös mukana rahoittamassa tutkimushankkeita, joiden tavoitteena on kehittää aurinkosähköjärjestelmiä.

Työ tarkastelee tärkeimpiä aurinkokennoteknologioita, joita ovat yksikiteiset- ja monikiteiset piipaneelit sekä ohutkalvopaneelit ottaen huomioon myös materiaalien ja ympäristön merkityksen. Jotkut aurinkokennoteknologiat sisältävät kriittisiä tai myrkyllisiä materiaaleja kuten indiumia ja kadmiumia, jotka ovat kuitenkin välttämättömiä paneelin toimivuuden ja tehokkuuden takaamiseksi. Kriittiseksi materiaaliksi määritellään raaka-aine, jolla on merkitystä EU:n taloudelle ja sillä on suuri saatavuusriski. Tämän myötä aurinkokennojen kierrättämisen merkitys on kasvanut, jotta esimerkiksi kriittisten aineiden saaminen toissijaisista lähteistä eli kierrätyksestä olisi tulevaisuudessa mahdollista. Tärkeää on myös varmistaa myrkyllisten materiaalien turvallinen kierrätys.

Lisäksi työssä esitellään kehitteillä olevia aurinkokennoteknologioita; nanokidekennot ja orgaaniset kennot, jotka kuuluvat kolmannen sukupolven aurinkokennoihin. Niissä on pyritty yhdistämään korkea tehokkuus ja alhaiset kustannukset. Kehitteillä olevissa kennoissa pyritään käyttämään turvallisia materiaaleja, joita on kattavasti saatavilla.

Työ kartoittaa myös yleisimmät käytöstä poistettujen aurinkokennojen kierrätysmenetelmät sekä muutamia kehitteillä olevia menetelmiä. Aurinkopaneelien lisääntyneen käytön vuoksi myös niistä muodostuneet jätevirrat tulevat kasvamaan merkittävästi lähitulevaisuudessa, minkä vuoksi investointeja uusiin kierrätysteknologioihin tarvitaan.

Asiasanat: aurinkokenno, uusiutuva energia, kierrätys

ABSTRACT

Photovoltaic technologies and their recycling

Maria Nyman

University of Oulu, Degree Programme of Environmental Engineering

Bachelor's thesis 2019, 37 pp.

Supervisor(s) at the university: D.Sc.(Tech.) Jenni Ylä-Mella

The purpose of this bachelor's thesis was to discover the amount of solar energy used, the most popular solar technologies and those which are under development and also their recycling technologies.

This thesis approaches the topic from the perspective of European Union's environmental policy, in which climate change acts as a driving force for increased use of solar energy. The purpose of the European Union's Renewable Energy Directive (RED II) is to increase the use of renewable energy, including in electricity generation. The EU is also financing research projects that aim to develop photovoltaic systems.

This thesis introduces the most important solar cell technologies, which are monocrystalline- and polycrystalline silicon panels and thin-film panels, also considering the significance of materials and the environment. Some solar cell technologies contain critical or toxic materials such as indium and cadmium, which are necessary to ensure the efficiency and functioning of a panel. Critical material is defined as a raw material, which has a significant importance to the EU economy and also has a high availability risk. Because of what's mentioned above, the importance of recycling solar cells has increased, so that obtaining critical materials from secondary sources would be possible in the future. It is also important to ensure the safe recycling of toxic materials.

In addition, this thesis introduces recycling technologies that are under development; nano solar cells and organic cells, which belong to third generation solar cells. High efficiency and low costs have been combined in these technologies. Safe materials, that have an excellent availability are also used in these technologies.

This thesis also introduces the recycling technologies for used solar panels and some of the recycling technologies that are under development. Because of increased usage of solar panels, the waste stream will also increase significantly in the near future, which leads to a need for investments in new recycling technologies.

Keywords: solar cell, renewable energy, recycling

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

1 JOHDANTO	8
2 AURINKOKENNOJEN HISTORIA JA NYKYTILA	10
3 AURINKOKENNOJEN RAKENNE	13
3.1 Aurinkopaneelien toimintaperiaate	13
3.2 Aurinkokennoissa käytettävät materiaalit	14
4 AURINKOKENNOTEKNOLOGIAT	15
4.1 Yksikiteinen piipaneeli	16
4.2 Monikiteinen piipaneeli	18
4.3 Ohutkalvopaneeli	18
4.4 Kolmannen sukupolven aurinkokennot	20
4.4.1 Nanokidekenno	20
4.4.2 Orgaaninen aurinkokenno	21
5 KÄYTÖSTÄ POISTETTUIJEN aurinkopaneelien KÄSITTELY	23
5.1 Keräyksen ja kierrätyksen nykytila	23
5.2 Käytössä olevat kierrätysteknologiat	24
5.2.1 Piikennoille suunnatut kierrätysteknologiat	24
5.2.2 Ohutkalvokennoille suunnatut kierrätysteknologiat	26
5.3 Kehitteillä olevat kierrätysteknologiat	26
6 POHDINTA	29
LÄHDELUETTELO	

MERKINNÄT JA LYHENTEET

RED II	EU:n määräämä uusiutuvan energian direktiivi, jonka mukaan uusiutuvien energianlähteiden tulee täyttää 32% osuus energian loppukulutuksesta EU:ssa vuoteen 2030 mennessä
GW	gigawatti
Si	pii
CdTe	kadmium-telluridi
CIGS	kupari-indium-gallium-seleeni
Cd	kadmium
In	indium
Te	telluuri
Ga	gallium

1 JOHDANTO

Euroopan Unionin (EU) ympäristöstandardit on kehitetty vuosikymmenten aikana ja ne ovat maailmanlaajuisesti korkeinta tasoa. Ympäristöpolitiikan tarkoituksena on muun muassa suojata Euroopan luonnonvaroja sekä auttaa EU:n taloutta ympäristöystävällisemmäksi. Ympäristöä koettelevat ilmastonmuutos, kestämatön kulutus ja tuotanto sekä saasteet. (EUR-Lex, 2019a) Ilmastonmuutoksesta saadut lisääntyvät todisteet sekä kasvava riippuvuus energiantuonnista ovat vahvistaneet Euroopan unionin päätöstä, joka koskee EU:n muuttumista matalaenergiataloudeksi sekä energian tuottamista turvallisilla, kilpailukykyisillä, paikallisilla sekä kestäville keinoilla. (EUR-Lex, 2019b)

EU:n säätämän uusiutuvan energian direktiivin (RED II) mukaan uusiutuvien energianlähteiden tulee täyttää 32 % osuus energian loppukulutuksesta EU:ssa vuoteen 2030 mennessä. Jäsenvaltioiden tulee varmistaa, että EU:n määräämä tavoite toteutuu. Direktiivin tavoitteena on edistää uusiutuvaa energiaa muun muassa sähköntuotannossa, lämmityksessä, jäähdytyksessä sekä liikenteessä. (Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2018/2001/EU)

Euroopan komissio tukee uusiutuvien energianlähteiden kuten aurinkosähköjärjestelmien kehittämistä ilmastonmuutoksen estämiseksi rahoittamalla tutkimushankkeita. Aurinkosähköjärjestelmiin liittyvien tutkimushankkeiden tarkoituksena on löytää uusia materiaaleja, suunnitella ja parantaa aurinkosähkökennoja sekä lisätä niiden tehokkuutta. (Euroopan komissio, 2019)

Suomessa sekä EU:ssa on lisääntynyt huoli teknologiateollisuudessa käytetyistä raaka-aineista sekä niiden saatavuudesta ja riittävydestä. Tarpeeseen voidaan vastata lisäämällä kiertotaloutta ja raaka-aineiden kierrätettävyyttä. Elektroniikkaromu, muun muassa elinkaaren lopussa olevat aurinkopaneelit ovat yksi potentiaalisimmista kriittisten raaka-aineiden lähteistä niiden metallipitoisuuksien ja määrän vuoksi. (Sitra, 2019)

Maailmanlaajuisten aurinkopaneelimarkkinoiden kasvaessa myös käytöstä poistettujen aurinkopaneelien määrä kasvaa. Aurinkopaneelien käyttöikä on noin 25-30 vuotta ja ennusteiden mukaan suurin osa tällä hetkellä käytössä olevista aurinkopaneeleista

saavuttaa elinkaaren lopun 2030-luvun alkupuolella. Kasvava jätemäärä luo uudenlaisen ympäristöhaasteen, mutta myös mahdollisuuden luoda uusia taloudellisia väyliä koskien raaka-aineiden talteenottoa sekä teollisuusaloja, jotka keskittyvät aurinkopaneelien loppukäsittelyyn. Aurinkopaneelien kierrättäminen on välttämättömyys siirryttäessä uusiutuviin energianlähteisiin ja on saavutettava vakiintuneet, toimivat menetelmät, jotta osataan valmistautua paneelijätteen jyrkkään nousuun. (Irena, 2016)

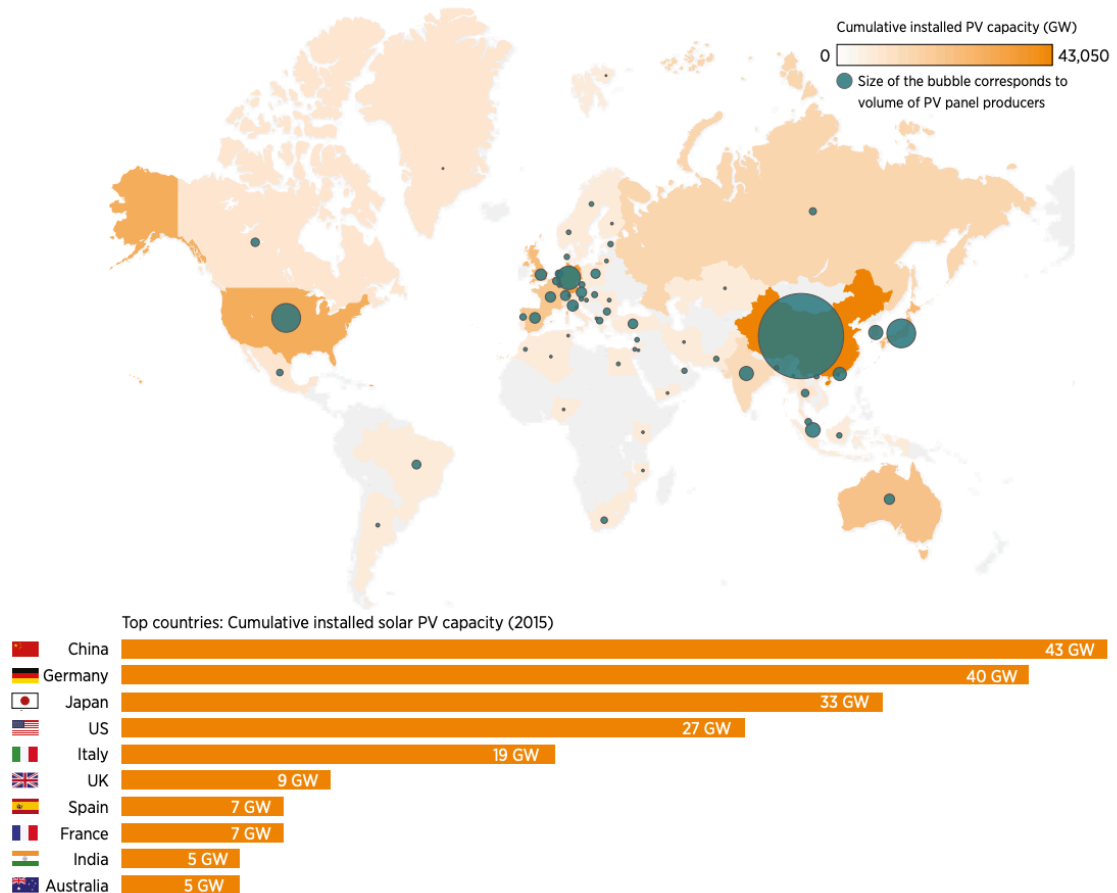
Tämän kandidaatin tutkielman tarkoituksena on kartoittaa aurinkoenergian tämänhetkiset käyttömäärät, tärkeimmät aurinkokennoteknologiat ja niiden tulevaisuuden näkymät. Työ tarkastelee eri teknologioiden elinkaaria ja selvittää aurinkopaneelien End-Of-Life-käsittelyn nykytilaa sekä kehitteillä olevia kierrätysteknologioita.

2 AURINKOKENNOJEN HISTORIA JA NYKYTILA

Valosähköilmiö on havaittu jo vuonna 1839 ranskalaisen fyysikon Edmond Becquerelin toimesta ja ensimmäisen aurinkopaneelin valmisti amerikkalainen keksijä Charles Fritts vuonna 1954. (Paulescu et al., 2012) Suomessa aurinkoenergiaa ja sen hyödyntämistä on tutkittu jo 1970-luvun lopulta lähtien. Eteneminen on ollut melko hidasta viime vuosiin saakka esimerkiksi haasteellisempien olosuhteiden ja tukien alhaisuuksien vuoksi verrattuna muihin EU-maihin. (Lähienergia, 2019)

Aurinkosähköinvestoinnit kasvoivat huomattavasti ensimmäistä kertaa vuonna 2015 ja kasvu jatkoi myös vuonna 2016. (Lähienergia, 2019) Aurinkopaneelien hinnat ovat jatkaneet laskuaan yhä vuonna 2018 tuotantomäärien kasvaessa. Kiinalla on iso rooli aurinkoenergiamarkkinoilla ja aurinkopaneelimarkkinat ovat sen vuoksi riippuvaisia Kiinan toimista. Kiinassa ja Taiwanissa valmistetaan noin 70-75 % maailmalla olevista aurinkopaneeleista. (Vantaan Energia, 2019). EU poisti vuonna 2018 aurinkopaneelien polkumyyntitullit ottaen huomioon uudet asetetut tavoitteet uusiutuvan energian suhteen EU:ssa, jolla haluttiin varmistaa, että kuluttajat voivat ostaa aurinkopaneeleja maailmanmarkkinatason hinnoilla. (Euroopan komissio, 2018) EU perusteli aiemmin tullien käyttöä sillä, että aurinkopaneeleja myytiin Euroopassa alle niiden markkina-arvon, mikä EU:n mukaan aiheutti vahinkoa Euroopassa oleville aurinkopaneelien tuottajille. (Euroopan komissio, 2013)

Tällä hetkellä aurinko tuottaa noin 2 % maailman sähköstä. Osuus on vielä varsin pieni, mutta aurinkopaneelit ovat kasvavassa suosiossa maailmalla muun muassa laskevien kustannusten ja pienten hiilidioksidipäästöjen ansiosta. Halvan tuotantotavan vuoksi aurinkosähkön osuus kasvaa nopeasti tulevaisuuden sähköntuotannossa. (Vattenfall, 2019). Kuvassa 1 on esitetty maailmanlaajuinen katsaus aurinkopaneelien tuottajista sekä kumulatiivinen aurinkopaneelien asennusmäärä gigawatteina vuonna 2015.



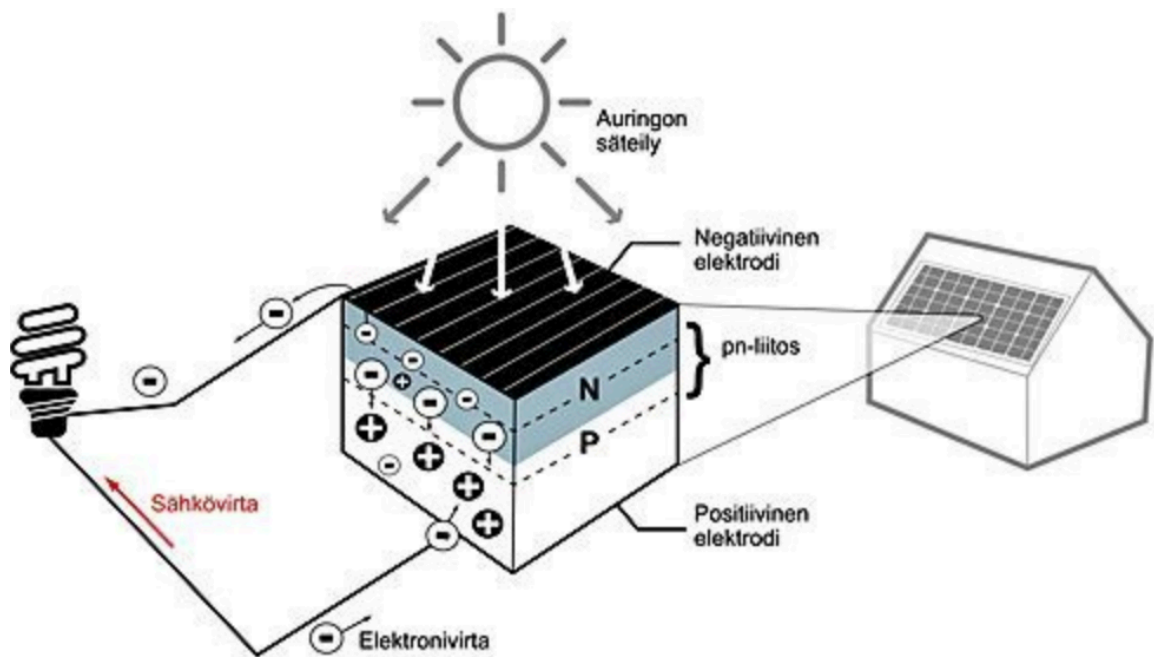
Kuva 1. Maailmanlaajuinen katsaus aurinkopaneelien tuottajista sekä aurinkopaneelien asennusmääristä maakohtaisesti (Irena, 2016).

Kuvasta nähdään, että Kiinassa, Saksassa ja Japanissa paneelien asennusten määrä on suurimmillaan ja suurin aurinkopaneelien tuottajamaa on selkeästi Kiina (Irena, 2016). Suomessa etuna aurinkosähkön tuotantoon on matala ympäristön lämpötila, jolla on kasvattava vaikutus aurinkokennojen hyötysuhteeseen. Aurinkopaneelit toimivat paremmin, mitä kylmemmät olosuhteet ovat. Paneeleita voidaan asentaa esimerkiksi rakennusten julkisivuihin, jolloin aurinkoenergiaa voidaan hyödyntää myös talvisin, kun aurinko paistaa matalalta. Suomessa tehdään korkeatasoista ja kansainvälisesti arvostettua aurinkoteknologian tutkimusta, joka keskittyy muun muassa aurinkokennoissa käytettäviin materiaaleihin, kennojen rakenteisiin sekä toisen ja kolmannen sukupolven aurinkokennoihin. Tutkimuksien tavoitteena on saavuttaa korkeita hyötysuhteita. Suomessa on myös jonkin verran paneelituotantoa. (Tekes, 2017)

Aurinkopaneelien ympäristökuormituksen syntyvät pääsääntöisesti niiden valmistusprosessissa. Aurinkoenergia ei itsessään aiheuta päästöjä käytön aikana. Päästöt ja ympäristövaikutukset syntyvät aurinkopaneelien valmistuksessa tarvittavista materiaaleista, asennustyöstä sekä käytön aikana muun muassa sähköstä, jota tarvitaan pumppuihin. Onnettomuustilanteissa voi kuitenkin päästä haitallisia kemikaaleja ympäristöön. (Ilmasto-opas, 2019)

3 AURINKOKENNOJEN RAKENNE

Aurinkopaneeli koostuu suuresta määrästä aurinkokennoja, jotka on kytketty sarjaan. Aurinkokenno puolestaan muodostuu kahdesta tasaisesta puolijohdekerroksesta, joita erottaa niin sanottu rajapinta. Kummallakin kerroksella on sisäänrakennettu ominaisuuksia, jotka poikkeavat keskenään. (Käpylehto, 2016). Toisella puolella rajapintaa on n-tyyppinen puolijohde ja toisella taas p-tyyppinen puolijohde. Puolijohdemateriaalin toiminta perustuu siihen, että se toimii normaaliolosuhteissa eristeenä, mutta energian osuessa siihen se muuttuu sähköä johtavaksi. (Erat et al., 2008) Kennoon muodostuu sisäinen sähkökenttä, kun elektronit kasautuvat toiselle puolelle siten, että ne jättävät aukkoja toiselle puolelle. (Käpylehto, 2016). Kuvassa 2 on esitetty pn-liitokseen pohjautuvan aurinkokennon toimintaperiaate.



Kuva 2. Pn-liitokseen pohjautuvan aurinkokennon toimintaperiaate (Ahoranta, 2019).

3.1 Aurinkopaneelien toimintaperiaate

Aurinkosähköä saadaan hyödyntämällä auringon säteilyenergiaa. Auringonsäteily sisältää fotoneita eli hiukkasia, jotka toimivat säteilyenergian kuljettajina. Kun fotonit osuvat aurinkokennoon, ne luovuttavat niissä olevan energian kennossa olevan materiaalin elektroneille. Tämä fotoneilta saatu energia muodostaa elektroneissa

sähkövirran aurinkokennojen virtajohtimiin. Aurinkopaneeli tuottaa tasasähköä, joka eroaa yleisessä sähköverkossa olevasta vaihtosähköstä. Tasasähkö voidaan hyödyntää sellaisenaan tai se voidaan muuttaa vaihtosuuntaajan avulla vaihtosähköksi. Syntynyt tasasähkö voidaan myös varastoida akkuihin, joista sitä voidaan käyttää tasa- tai vaihtosähköä. (Motiva, 2017)

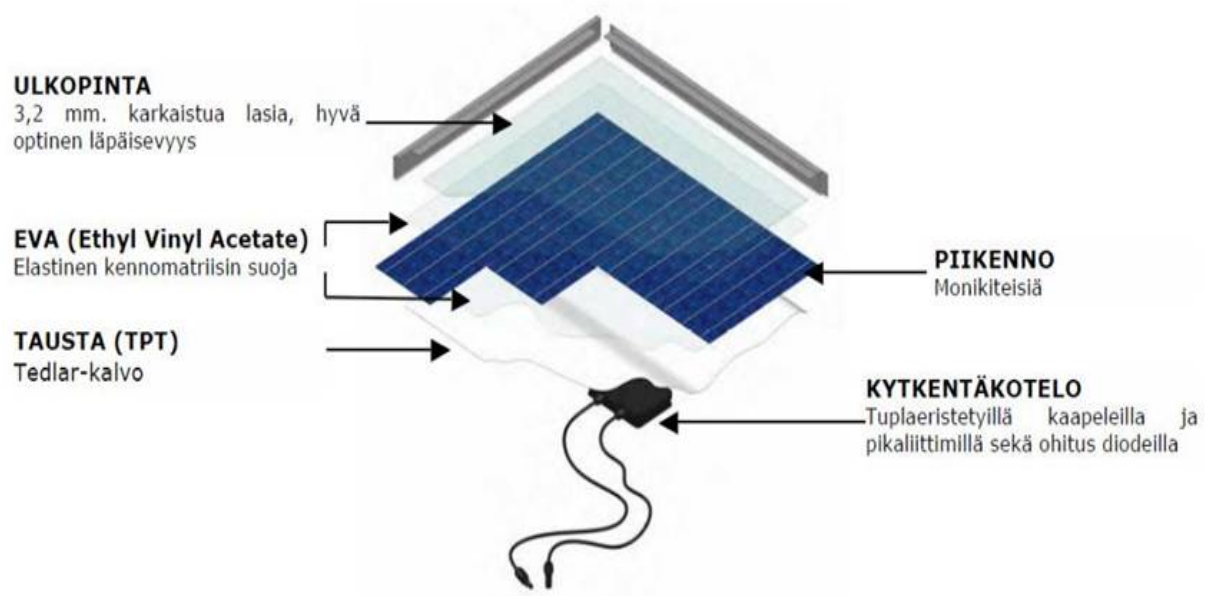
3.2 Aurinkokennoissa käytettävät materiaalit

Piipohjaisissa aurinkokennoissa yleisin käytettävä materiaali on pii (Si), joka on maankuoren toiseksi yleisin alkuaine ja jota saadaan luonnosta lähinnä kivistä ja kalliosta (Erat et al., 2008). Piitä käytetään yksi- ja monikiteisenä ja amorfisessa muodossa (Käpylehto, 2016). Piin lisäksi metallit ovat välttämättömiä aurinkokennoteknologioille. Ne toimivat tärkeänä komponenttina kennoissa tai niitä käytetään parantamaan kennojen tehokkuutta. (Bailey, 2014) Aurinkopaneelien valmistukseen tarvitaan 19 eri kaivannaista. Näiden kaivannaisten tarve on kasvanut aurinkopaneelien kiihtyvän asentamisen vuoksi. Kriittisimmät aineet, jotka ovat välttämättömiä aurinkopaneelituotannolle ovat kupari, indium seleeni, telluuri, gallium, hopea, germanium ja tina. (Tekniikka & Talous, 2017) Edellä mainittuja metalleja on rajoitetusti saatavilla, joten se aiheuttaa kasvavaa huolta uusien teknologioiden kehittämiseksi; yksi- ja monikiteisissä piipaneeleissa hopea, amorfisissa piipaneeleissa germanium, ohutkalvopaneeleissa kadmium-telluridi, CIGS-paneeleissa indium ja gallium. (Bailey, 2014) Nämä harvinaiset metallit saadaan pääsääntöisesti sivutuotteena muiden metallien tuotantoprosesseista ja niiden riittävyys on tärkeää aurinkopaneeliteollisuuden kannalta (USGS, 2010).

4 AURINKOKENNOTEKNOLOGIAT

Aurinkokennoteknologiat jaetaan kolmeen sukupolveen. Ensimmäisen sukupolven aurinkokennoja ovat yksi- ja monikiteiset piikennot (mono-Si ja poly-Si). Toisen sukupolven aurinkokennoja ovat ohutkalvoaurinkokennot. Edellä mainittujen aurinkokennojen teknologia pohjautuu valosähköiseen ilmiöön ja puolijohteiden pn-liitoksen muodostamaan sähkökenttään. Kolmannen sukupolven aurinkokennot ovat vielä kehitteillä. Yhtenä esimerkkinä on nanokidekenno, jonka toiminta perustuu kemiallisiin reaktioihin. Nanokidekennojen lisäksi on kehitteillä muitakin aurinkokennotyyppejä, esimerkiksi joustavat aurinkokennot sekä orgaaniset aurinkokennot. (Motiva, 2017)

Aurinkopaneelitekniikka kehittyy nopeasti, mutta paneelien perusrakenne on pysynyt melko samanlaisena vuosien ajan. Suurin osa käytetyistä aurinkopaneeleista koostuu piikiteisistä kennoista, jotka on kytketty sarjaan. Tyypillinen piipaneeli koostuu seuraavista pääkomponenteista: metallikehikko, karkaistu lasi, kapselointikalvo (EVA), sarjaan kytketyt aurinkokennot, taustakalvo sekä kytkentäkotelo. Metallikehikko valmistetaan usein alumiinista tai teräksestä. Kapselointikalvo toimii liima-aineena ja se yhdistää lasin sekä taustakalvon aurinkokennoihin. Aurinkokennot on valmistettu joko yksi- tai monikiteisellä tekniikalla. Taustakalvona toimii Tedlar-kalvo, joka tarjoaa kestävästä taustalevyn aurinkopaneelille. (NREL, 2008) Kuvassa 3 on esitetty tyypillinen piistä valmistetun aurinkopaneelin rakenne.



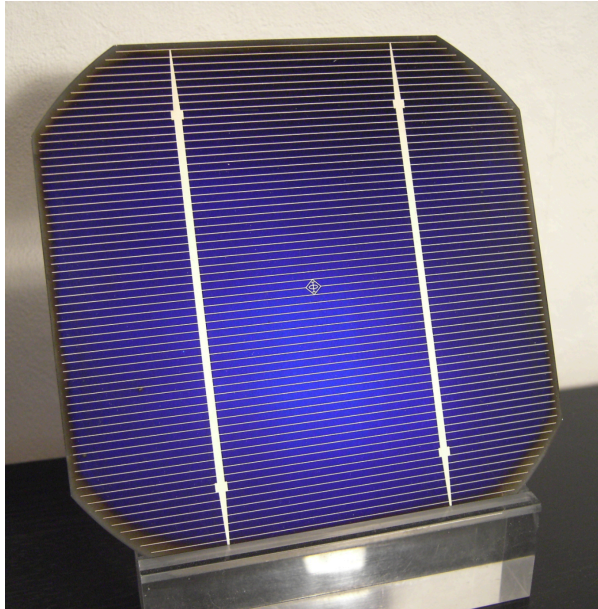
Kuva 3. Piistä valmistetun aurinkopaneelin rakenne (Kekkonen, 2014).

4.1 Yksikiteinen piipaneeli

Yksikiteinen piipaneeli on vanhin ja vakiintunein kaikista kolmesta aurinkokennosukupolvista. Sen kenno muodostuu yksittäisistä piikiteistä. Yksikiteiset piipaneelit valmistetaan puhdistamalla ja jalostamalla luonnossa esiintyvää piitä. Kennot sahataan yhtenäisestä piiaihiosta, jonka halkaisija on 10-16 cm. Piikiteen rakenne valmistetaan piikidettä kasvattavalla prosessilla käyttäen Czochralski-menetelmää, jossa siemenkiteen ympärille kasvatetaan yhtenäinen kiderakenne ja näin saavutetaan tankomuoto. Piitangosta sahataan piikiekkoja, joiden paksuus on noin 0,2 mm. (SolarReviews, 2019) Raaka-aine on kallista, joten kiekkoista ei kannata leikata neliskulmaisia. Piikiekoista kuitenkin leikataan pienet palat kulmista pois, jotta saavutetaan mahdollisimman suuri aktiivinen pinta-ala aurinkopaneelissa. (Käpylehto, 2016) Piikiekkojen valmistusprosessissa merkittävä määrä alkuperäisestä piistä päätyy jätteeksi (SolarReviews, 2019).

Piikidekennojen hyötysuhteeseen vaikuttaa negatiivisesti muun muassa metallijohteiden liitokset paneelien pinnalla, heijastukset paneelien päällä suojaavasta lasista sekä resistanssi. Yksikiteisen aurinkokennon tunnistaa pyöristetyistä reunoista sekä mustasta väristä. Yksikiteinen piikenno on kallis, sillä sen valmistaminen on hidasta ja vaatii huolellista työtä. Raaka-aineen täytyy olla puhdasta ja kennon valmistustapa on teknisesti

haastava, mikä kasvattaa tuotantokustannuksia. Yksikiteisen piikennon todellinen hyötysuhde on 16-25 %, joka on suurempi kuin esimerkiksi monikiteisen piikennon, sillä yksikiteiset kennot on valmistettu puhtaammasta, korkealaatuisemmasta piistä. (Käpylehto, 2016) Kuvassa 4 on esitetty yksikiteinen aurinkokenno.

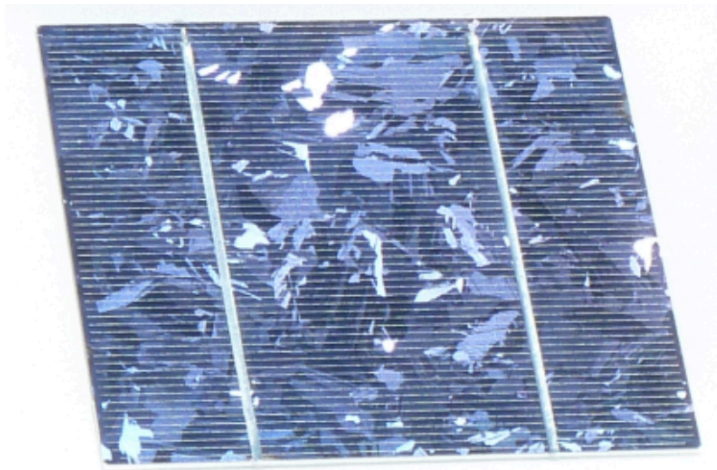


Kuva 4. Yksikiteinen piikkenno (Kambor, 2007).

Metallit ovat aurinkokennoissa välttämättömiä, kun halutaan maksimoida auringosta saatu energia. Yksi- ja monikiteisissä piikkennoissa tärkeimpinä metalleina ovat hopea ja kupari. Hopea omaa korkeimman sähkönjohtokyvyn verrattuna muihin metalleihin ja se heijastaa parhaiten valoa. Näiden fysikaalisten ominaisuuksien ansiosta hopea on arvokas metalli varsinkin aurinkopaneelien valmistuksessa. Hopeaa käytetään kennoissa niiden pintaliitoksissa ja kuparia yleensä sähkönjohtimissa. (USA Today, 2014) Hopeajauheesta valmistetaan hopeatahnaa, joka sijoitetaan piikiekkoon. Auringonsäteen osuessa kennoon muodostuu elektroneja, jotka johdetaan kennosta pois pinnalle juotettuiden hopeajohtimien avulla. Elektronit kulkeutuvat johteen kautta pois kennosta, jolloin tuotettu sähkö on käytettävissä. (Silver Institute, 2019) Hopea on ominaisuuksiensa vuoksi suotuista metalli paneelissa, mutta hopeatahna on komponenttina kallis. Tämä on yhtenä syynä sille, että hopean käyttö määrää pyritään vähentämään ja tutkimukset keskittyvät hopean korvaamiseen muilla metalleilla kuten kuparilla. (ITRPV, 2018) Lisäksi hopean rajallinen esiintyvyys maankuoressa saattaa rajoittaa aurinkokennotuotantoa maailmanlaajuisesti (Dittrich, 2018, s.227).

4.2 Monikiteinen piipaneeli

Monikiteinen piipaneeli on hyvin samanlainen teknisiltä ominaisuuksiltaan kuin yksikiteinen piipaneeli. Monikiteinen piipaneeli on edullisempi, sillä sen valmistusprosessi ei vaadi yhtä paljon huolellisuutta. Monikiteisissä kennoissa pii sulatetaan ja sen jälkeen valetaan kiinteään muotoon. Näin kennosta saadaan halutun muotoinen ja kokoinen. Kuvassa 5 on esitetty monikiteinen piikenno.



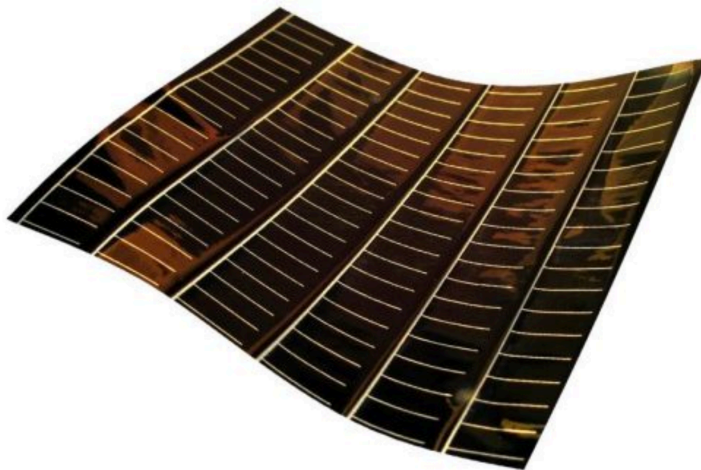
Kuva 5. Monikiteinen piikenno (Mueller, 2019).

Monikiteinen piikenno voidaan valmistaa neliskulmaisesta harkosta, minkä ansiosta raaka-aine voidaan hyödyntää tehokkaammin eikä sitä päädy yhtä paljon jätteeseen kuin yksikiteisten piikennojen valmistusprosessissa. Monikiteisten kennojen kiderakenne ei ole yhtenäinen, mikä heikentää monikiteisen piipaneelin hyötysuhdetta. (Käpylehto, 2016) Monikiteinen piikenno on väriltään sinertävä ja muotoilu on suorakulmainen. Yksikiteisten kennojen tapaan monikiteisissä aurinkokennoissa tärkeimmät metallit ovat kupari ja hopea, joita käytetään pintaliitoksissa sekä sähkönjohtimissa.

4.3 Ohutkalvopaneeli

Ohutkalvopaneeli kuuluu toisen sukupolven aurinkokennoihin ja sen toiminta perustuu ensimmäisen sukupolven kennojen tapaan valosähköiseen ilmiöön (Solar Power World, 2018). Ohutkalvopaneeleissa absorboiva kerros on huomattavasti ohuempi kuin kiteisissä kennoissa, joten materiaalia tarvitaan vain vähän (VTT, 2014). Ohutkalvopaneelien tuotantokustannukset ovat huomattavasti alhaisemmat kuin kiteisillä paneeleilla.

Ohutkalvopaneelit voidaan jakaa valmistuksessa käytettävän raaka-aineen mukaan; amorfinen pii (a-Si) -, kadmium-telluridi (CdTe) -, kupari-indium-gallium-seleeni (CIGS) -, tai galliumiton (CIS) -paneeleihin (Solar Power World, 2018). Ohutkalvokenno valmistetaan ohuista kerroksista valoherkkää ainetta, jotka asetetaan pohjamateriaalille kuten lasille, ruostumattomalle teräkselle tai muoville. Ohutkalvopaneeli voidaan asettaa haastaviinkin paikkoihin sen joustavuuden ja taipuisuuden ansiosta. (Lehto et al., 2017) Ohutkalvokenno päästää lävitse enemmän valoa kuin piikidekennot, joten niihin kohdistuvaa auringonsäteilyä ei saada talteen yhtä paljon. Ohutkalvokennot toisaalta sietävät paremmin varjoa, mutta niiden teho pinta-alaa kohti on pienempi verrattuna kiteisiin kennoihin. (Motiva, 2017) Kuvassa 6 on esitetty yksi yleisimmistä ohutkalvo kennotyypeistä eli CdTe-aurinkokenno.



Kuva 6. CdTe-aurinkokenno (Swiss Federal Laboratories for Materials and Technology, 2011).

Ohutkalvopaneeleita kehitettäessä tarkoituksena oli luoda edullisempi vaihtoehto, jossa käytettäisiin suhteellisen pieniä materiaalmääriä. CdTe, CIGS ja a-Si ovat pääteknologiat, joita käytetään ohutkalvopaneeleissa. Vaikka ohutkalvopaneelit sisältävät huomattavasti vähemmän materiaalia kuin piikidekennot, huolta aiheuttavat niissä käytettävien materiaalien, kuten telluuri (Te), indium (In) ja kadmium (Cd), saatavuus ja myrkyllisyys. CdTe-kennot sisältävät huomattavan määrän kadmiumia (Cd), joka itsessään on myrkyllistä ihmiselle sekä ympäristölle. Kadmium-telluridi -yhdisteellä on myös joitakin toksisia ominaisuuksia, mutta yleisesti sitä ei pidetä harmillisena ihmiselle tai ympäristölle. (Lunardi et al, 2018) Telluuri ja indium ovat erittäin harvinaisia

alkuaineita. Telluuria saadaan pääsääntöisesti sivutuotteena kuparin louhinnassa. On kuitenkin epätodennäköistä, että esimerkiksi kuparin louhintaa lisättäisiin ainoastaan telluurin saamiseksi. Indiumia saadaan pääosin sivutuotteena sinkkimalmin tuotantoprosessista. Indiumin korkea kysyntä on luonut potentiaalin kehittää teknologioita indiumin talteen ottamiseksi elektroniikkajätteestä ja tulevaisuudessa se voi toimia merkittävänä lähteenä indiumille. Telluurin, indiumin sekä muiden aurinkokennoissa käytettävien harvinaisten metallien saanti toissijaisista lähteistä kuten talteenotosta ja kierrättämisestä tulee todennäköisesti kasvamaan ajan myötä aurinkokennojen kierrättämisen seurauksena. (USGS, 2010) Amorfisella piillä on alhainen toksisuus ja se on edullista, mutta toisaalta sillä on alhainen kestävyys ja tehokkuus muihin ohutkalvoteknologioihin nähden (Lunardi et al., 2018).

4.4 Kolmannen sukupolven aurinkokennot

Vaihtoehtoisten kestävien energianlähteiden tavoittelu on johtanut kolmannen sukupolven aurinkokennojen kehittämiseen. Kolmannen sukupolven aurinkokennoissa pyritään yhdistämään tekniikat, jotka sisältävät sekä korkean tehokkuuden että alhaiset kustannukset. (Fthenakis, 2012) Yhtenä syynä uusien kennojen kehittämiseksi on muun muassa puutteet perinteisissä epäorgaanisissa aurinkokennoissa. Puutteita ovat esimerkiksi monimutkainen ja energiaa kuluttava valmistusprosessi, mikä johtaa korkeisiin tuotantokustannuksiin ja lisäksi epäorgaaniset kennot myös usein sisältävät harvinaisia sekä vaarallisia materiaaleja. (Hachmann et al., 2011)

4.4.1 Nanokidekenno

Yksi kehitteillä olevista tekniikoista on nanokidekennot, joita kutsutaan myös Grätzel-kennoiksi tai väriaineherkistetyiksi aurinkokennoiksi (DSSC) (Motiva, 2019). Nanokidekennot kuuluvat ohutkalvokennojen kanssa samaan kategoriaan. Tällä hetkellä ne ovat kuitenkin kehitysvaiheessa eikä niitä ole vielä kaupallistettu. Kehitystä vaaditaan, sillä valmistusmateriaalien kustannukset ovat suhteellisen korkeat eivätkä ne ole vielä tarpeeksi vakaita pitkäaikaiseen käyttöön. (Sharma et al. 2018) Nanokidekennojen toiminta ei perustu pn-liitokseen, vaan elektronien liike perustuu kemiallisiin reaktioihin; värिमolekyylien ja puolijohdemateriaalin vuorovaikutukseen ja varauksien kulkeutumiseen elektrolyytin kautta. (VTT, 2014) Säteilyn osuessa väriainehiukkasiin kennossa vapautuu elektroneja, jotka johtuvat puolijohtavan titaanidioksidikerroksen

kautta ulkoiseen virtapiiriin (Motiva, 2019). Kennot tehdään nanokokoisista titaanidioksidihiukkasista, jotka käsitellään elektrolyyttiliuoksella sekä pinnoitetaan väriainehiukkasilla, jotka absorboivat säteilyä. Toisaalta nanokidekennojen suorituskyky voi heikentyä niiden altistuessa jatkuvasti UV-valolle sekä niissä käytettävä nestemäinen elektrolyytti voi aiheuttaa ongelmia jäätymisriskin vuoksi. (Irena, 2012) Nanokidekennoissa käytettyä titaanidioksidia (TiO_2) on saatavilla runsaasti ja sitä pidetään turvallisena puolijohtavana materiaalina, jonka käyttö ja jalostaminen on suosittua sen alhaisen hinnan vuoksi. Nanoteknologioiden kehittyessä on tutkittu TiO_2 – nanohiukkasia ja on havaittu, että niillä on joitain haitallisia vaikutuksia ihmiselle, joten nanohiukkasten käsittely tulee olla huolellista. (Skocaj et al., 2007)

4.4.2 Orgaaninen aurinkokenno

Toinen kehitteillä oleva aurinkokennotyyppi on orgaaninen aurinkokenno, joka kuuluu myös ohutkalvokennojen kanssa samaan kategoriaan. Orgaanisia kennoja pidetään lupaavana kustannustehokkaana sekä ympäristöystävällisenä vaihtoehtona sen rakenneosien ja perusmateriaalien saatavuuden vuoksi, alhaisten kustannusten sekä suhteellisen helpon kemiallisen synteesin ansiosta. Lisäksi orgaanisissa aurinkokennoissa käytettäviä materiaaleja valmistetaan vakiintuneella tekniikalla eikä lopputuote sisällä myrkyllisiä materiaaleja. (Hösel et al., 2014) Orgaanisissa aurinkokennoissa käytetään sähköä johtavia orgaanisia polymeerejä tai pieniä orgaanisia molekyylejä. Kenno koostuu useasta valoaktiivisesta kerroksesta ohutta orgaanista höyryä tai liuosta, joka sijoitetaan kahden elektrodin väliin. (Energy Sage, 2019) Orgaaniset aurinkokennot ovat joustavia ja kevyitä, ja ne voidaan valmistaa joko lasi- tai muovialustalle. Lisäksi orgaanisten puolijohteiden korkeat absorptiokertoimet mahdollistavat erittäin ohuiden kalvojen käytön. Tärkeimmät edut orgaanisissa kennoissa ovat sen kevyt paino, mekaaninen joustavuus, helppo käsittely ja alhaiset kustannukset. (Arbouch et al., 2014) Lisäksi kennot valmistetaan painokoneilla, mikä mahdollistaa nopean massatuotannon (VTT, 2015). Tällä hetkellä orgaanisten kennojen tuotantoprosessi ei ole kuitenkaan kovin ympäristöystävällinen. Orgaanisen valoaktiivisen kerroksen valmistusprosessissa käytetään halogenoituja liuottimia kuten klooribentseeniä, joka on sekä ihmiselle että ympäristölle vaarallista. Halogenoituja liuottimia ei esiinny luonnossa ja niiden tuotanto on suhteellisen kallista. Hiilivedyt olisivat parempi liuotinvaihtoehto ympäristöystävällisyyden ja saatavuuden vuoksi. Hiilivetyjen käyttäminen valmistusprosessissa kuitenkin alentaa kennon tehokkuutta

merkittävästi. (Zhao et al., 2016) Ympäristöystävällisemmän valmistusprosessin lisäksi teknologista kehitystyötä tarvitaan edelleen, sillä tällä hetkellä orgaanisten kennojen tehokkuus on matala ja käyttöikä lyhyt verrattuna muihin aurinkokennotekniikoihin (Energy Sage, 2019)

5 KÄYTÖSTÄ POISTETTUIJEN AURINKOPANEELIEN KÄSITTELY

5.1 Keräyksen ja kierrätyksen nykytila

Aurinkopaneelit on suunniteltu tuottamaan uusiutuvaa energiaa noin 25-30 vuoden ajan. Paneelien asennusten määrä maailmalla kasvaa jatkuvasti nopeaa tahtia. Ensimmäiset merkittävät asennukset tapahtuivat 1990-luvun alkupuolella ja 2000-luvun alusta lähtien aurinkosähkön sähköjakelu on kasvanut erittäin nopeasti. (Fthenakis, 2000) Lisääntyneen paneelien käytön takia käytöstä poistuvien laitteiden määrä kasvaa vielä nopeammin lähitulevaisuudessa. Vuoden 2016 lopussa aurinkopaneeleista kerääntynyt jäte oli yli 250 000 tonnia. Ennusteiden mukaan vuoden 2050 mennessä aurinkopaneeleista muodostuneen jätteen määrä on 5,5 – 6 miljoonaa tonnia. Aurinkopaneelien kierrätykseen soveltuvia kierrätystapoja kehitetään jatkuvasti, jotta voitaisiin vähentää käytöstä poistuneista paneeleista aiheutuvaa ympäristökuormitusta ja hyödyntää niissä olevia arvokkaita materiaaleja. Tällä hetkellä käytössä olevat kierrätysprosessit pystyvät hyödyntämään vain osan materiaaleista ja aurinkopaneelin arvosta, joten menetelmissä on kehittämisen varaa. (Irena, 2016)

Useimmat maat ympäri maailmaa Euroopan unionin ulkopuolella luokittelevat aurinkopaneelit yleis- tai teollisuusjätteeksi. Tällä hetkellä vain EU on määrännyt aurinkopaneelille erilliset säännökset niiden kierrätykselle. EU on edelläkävijä elektroniikkajätteitä koskevissa säännöksissä, jotka kattavat materiaalien keräyksen, talteenoton sekä kierrätystavoitteet. EU:n sähkö- ja elektroniikkajätettä koskevien sääntöjen mukaan kaikki tuottajat, jotka toimittavat aurinkopaneeleita Euroopan markkinoille, ovat vastuussa paneelien keräyksen sekä kierrättämisen rahoittamisesta paneelien saavuttaessa niiden käyttöikänsä lopun. (Irena, 2016)

Suurin osa aurinkopaneeleista aiheutuvasta jätteestä päättyy kaatopaikalle EU:n ulkopuolella. Paneelit sisältävät raskasmetalleja kuten lyijyä ja tinaa, mikä voi väärin kierrätettynä johtaa merkittäviin ympäristöongelmiin. (Lunardi et al, 2017) Lisäksi kennot sisältävät arvokkaita metalleja kuten hopeaa ja kuparia, kriittisiä metalleja kuten indiumia ja telluuria sekä myrkyllisiä materiaaleja kuten kadmiumia, lyijyä ja seleeniä. Maailmanlaajuisesti näiden materiaalien talteenotto olisi siis merkittävää. (Irena, 2016)

Vain noin 10 % maailman aurinkokennoista kierrätetään ja yksi siihen johtava syy on säännösten puute. On osoitettu, että nykyisellä kierrätystekniikalla piipohjaiset aurinkopaneelit eivät sisällä tarpeeksi arvokkaita materiaaleja, jotta niiden kierrättäminen olisi kannattavaa. Kierrätysprosessin kustannukset ovat korkeammat kuin jätteen päätyminen kaatopaikalle, jolloin kierrätyksestä tulee epäsuotuisa vaihtoehto. (Sener et al., 2014) Vuoteen 2050 mennessä odotetaan, että kierrätettävissä olevien materiaalien arvo voisi ylittää jopa 15 miljardiin dollariin (Lunardi et. al, 2018).

5.2 Käytössä olevat kierrätysteknologiat

Euroopassa kerättiin yli 15 000 tonnia aurinkopaneelijätettä vuoden 2016 loppuun mennessä. Suurin osa näistä paneeleista olivat piipaneeleita. Aurinkopaneeleista muodostuneen jätevirtojen lisääntyessä nykyiset markkinat saattavat tulla kyllästyneiksi ja investointeja uusiin kierrätysteknologioihin vaaditaan.

Yksikiteisten ja monikiteisten piipaneelien kierrätysteknologiat on kehitetty jo melko pitkälle ja Euroopassa on kaupallistettu niille soveltuva mekaaninen kierrätysmenetelmä (IEA, 2018). Ohutkalvokennoista kadmium-telluridi -tekniikalle on myös kehitetty kaupallinen kierrätysmenetelmä, mutta muiden ohutkalvokennotyyppien kierrättäminen vaatii vielä kehittämistä (Sener et al, 2014). Eurooppalaiset aurinkoteollisuudessa olevat yritykset perustivat voittoa tavoittelemattoman PV Cycle-yhdistyksen vuonna 2007. Yhdistyksen tavoitteena oli valmistaa laadukas ja kattava aurinkopaneelien kierrätysjärjestelmä EU:n tasolla. PV Cycle on toiminut käytettyjen aurinkopaneelien kierrättäjänä vuodesta 2010 lähtien. He tarjoavat käytöstä poistettavien paneelien keräystä sekä kierrätystä Euroopassa. PV Cyclen kierrätyslaitos sijaitsee Saksassa ja sillä on 351 keräyspistettä ympäri Eurooppaa. Heidän EoL-palvelu sisältää sekä kiteisen piin että ohutkalvoteknologioiden kierrätyksen. (Euroopan komissio, 2016)

5.2.1 Piikennoille suunnatut kierrätysteknologiat

Piikennojen kierrätysprosessi voidaan jakaa karkeasti kahteen osaan; kapselointikalvon erottaminen laminoidusta rakenteesta sekä metallien ja piin talteenotto. Piikennojen tärkeimmät komponentit kuten lasi, alumiini, kupari sekä hopea voidaan ottaa talteen täysin mekaanisin menetelmin. Toisaalta ilman lämpöä tai kemiallisia sekä metallurgisia

keinoja epäpuhtauksien määrä kierrätetyissä materiaaleissa voi olla suuri, mikä alentaa niiden jälleenmyyntihintaa. (IEA, 2018)

Piikenoissa käytettyjen materiaalien talteenoton ja kierrätyksen ensimmäinen askel on erottaa tärkeimmät komponentit kuten laminoitu lasi, metallikehikko, johtimet sekä polymeerit toisistaan. Tärkein sekä teknisesti haastavin prosessi on erottaa lasia sisältävät rakenteet, piipohjaiset kennot ja polymeerikerrokset toisistaan. Usein piipaneelien kierrätys tapahtuu lasinkierrättäjillä, sillä laminoidun lasikomponentin kierrättäminen on suhteellisen edullinen prosessi. Lasimurskassa ovat epäpuhtaudet kuten polymeerijäännökset tai ruuvit poistetaan. Murskattu lasijae todennäköisesti sisältää vielä epäpuhtauksia, mutta se voidaan silti yhdistää muun kierrätetyn lasin kanssa. Tätä kierrätettyä lasia voidaan soveltaa lasikuitu- ja vaahtolasiteollisuudessa esimerkiksi lämpöeristysmateriaalina. Aurinkokennon rungossa oleva alumiini tai teräs ja johtimissa oleva hopea tai kupari voidaan kierrättää jo vakiintuneilla metallien kierrätysmenetelmillä, mutta metallit voidaan myös saada talteen kemiallisilla keinoilla. Polymeerijakeet voidaan useimmiten käsitellä jätteenpolttolaitoksissa. (Irena, 2016)

Mekaanisten menetelmien lisäksi käytetään termisiä sekä kemiallisia lähestymistapoja kapselointikalvon erottamiseen laminoidusta rakenteesta, jotta aurinkopaneelissa oleva pii saataisiin mahdollisimman puhtaana sekä ehjänä talteen. Termisellä lähestymistavalla tarkoitetaan polttamista tai krakkausprosessia. Piikennot lämmitetään uunissa 500-600 celsiusasteeseen. Uunissa polymeerikomponentit poltetaan/krakataan ja jäljelle jäävät materiaalit kuten pii, lasi ja metallit erotetaan manuaalisesti. Lasi ja metallit lähetetään kierrätykseen. Jäljelle jäänyt pii kierrätetään ja niistä tehdään piikiekoja syövyttämällä. Kierrätetyistä piikiekoista voidaan valmistaa uusia kennoissa hyödynnettäviä piikiekoja prosessoimalla ne uudestaan aurinkokennoja valmistavalla tuotantolinjalla. Tätä kierrätysmenetelmää ei ole kuitenkaan kaupallistettu taloudellisista syistä sekä rajallisen kysynnän vuoksi. Yllä mainitun menetelmän pohjalta on kehitetty uusia paranneltuja teknologioita. (IEA, 2018)

Kemiallinen lähestymistapa perustuu puolestaan liuottimien käyttöön ja erilaisiin kemiallisiin reaktioihin. Kennot upotetaan liuottimiin ja komponentin erotetaan toisistaan hyödyntäen kemiallisia reaktioita. Usein kemialliset menetelmät ovat ajallisesti hitaampia kuin termiset menetelmät. Piitä saadaan kuitenkin enemmän talteen sekä siitä saadaan myös puhtaampaa kemiallisia menetelmiä käytettäessä. Kemiallisena liuottimena

voidaan käyttää esimerkiksi typpihappoa. Tässä menetelmässä kennot upotetaan typpihappoon ja tietyn ajan kuluttua kapselointikalvo (EVA) liukenee reaktiossa, jolloin jäljelle jäävät lasi, pii, sekä metallit voidaan erottaa ja ottaa talteen manuaalisesti. Tämän jälkeen talteen otetulle piille suoritetaan syövytysprosessi natriumhydroksidia käyttäen, jolloin se voidaan prosessoida piikiekoista jälleen piikennoiksi. (IEA, 2018)

5.2.2 Ohutkalvokennoille suunnatut kierrätysteknologiat

Ohutkalvokennojen kierrätys perustuu kapselointikalvon erottamiseen laminoidusta rakenteesta sekä puolijohdemateriaalin talteenottoon. Tällä hetkellä yleisin kierrätysmenetelmä CdTe-ohutkalvokennoille on yhdistelmä mekaanisia sekä kemiallisia menetelmiä. Kyseisessä kierrätysmenetelmässä mekaaninen vaihe kattaa murskaamisen ja kemiallinen menetelmä sisältää kapselointikalvon poiston laminoidusta rakenteesta sekä metallien talteenoton. (IEA, 2018)

Prosessi alkaa paneelin silppuamisella, jonka jälkeen suoritetaan murskaus noin 5 mm kokoisiksi partikkeleiksi vasaramyllyssä, jotta laminointisidos katkeaa. Seuraavaksi murskattu materiaali ohjataan hitaasti pyörivään rumpuun ja altistetaan seokselle, joka sisältää rikkihappoa sekä vetyperoksidia puolijohdekalvon erottamiseksi. Metallipitoiset esteet ja lasi ohjataan rummusta luokittelijaan sekä värisevään seulaan, jossa neste ja lasi erotetaan toisistaan. Tämän jälkeen lasi on kierrätettävissä. (BNL, 2009) Seuraavaksi toteutetaan saostaminen sekä suodatus kadmiumin (Cd) ja telluurin (Te) talteenottoa varten. Saostuneet Cd ja Te suodatetaan, jolloin puolijohteita sisältävä suodatuskakku voidaan varastoida jatkokäsittelyä varten. Kadmiumin ja telluurin lopullinen puhdistus ja talteenotto tapahtuu metallinjalostamalla. (Radziemska-Klugmann, 2012)

5.3 Kehitteillä olevat kierrätysteknologiat

Tutkimus- ja kehitystyöllä on tärkeä rooli uusien mahdollisimman tehokkaiden kierrätysmenetelmien kehittämisessä. Tutkimustyöllä vastataan nykyisiin sekä tulevaisuuden korkeampiin vaatimuksiin koskien materiaalien talteenotto- ja kierrätysastetta sekä lievennetään aurinkopaneelien ja niiden käsittelymenetelmistä aiheutuvia ympäristövaikutuksia. (IEA, 2018) Useiden maiden kuten Saksan, Kiinan ja Japanin julkisissa tutkimuslaitoksissa on aloitettu aurinkopaneelien kierrätysmenetelmien tutkimus- ja kehitystyö hallituksen tukemana. Tavallisesti aurinkopaneelien tuottajat ovat

keskittyneet lähinnä valmistusprosessiin jättäen huomiotta jälkikäsittelyn, joka kattaa paneelien korjauksen ja kierrätyksen. Kasvava aurinkopaneelijäte kuitenkin lisää tutkimus- ja kehitystyön tarvetta koko aurinkopaneelin elinkaareen eikä vain valmistukseen. (Irena, 2016)

Uusia aurinkokennojen kierrätysmenetelmiä kehitetään aktiivisesti ja tällä hetkellä tutkimus painottuu kapselointikalvon poistamiseen laminoidusta rakenteesta sekä lasin ja arvokkaiden metallien talteenottoon. Piikennojen tapauksessa halutaan erottaa lasi ja muut materiaalit toisistaan sekä otettua talteen metallit kuten hopea piikennosta. Ohutkalvokennoista halutaan saada talteen arvokkaat metallit kuten Cd, In, Te ja Ga. Tutkimushankkeet yleisimmin keskittyvät joko termisiin, mekaanisiin tai kemiallisiin kierrätysprosesseihin. Mekaanisten menetelmien tutkiminen on lisääntynyt kemiallisten menetelmien kustannuksella, sillä kemialliset prosessit vaativat pitkiä prosessiaikoja eivätkä ne sen vuoksi sopisi massamenetelmiksi suurille aurinkopaneelimäärille.

Yksikiteisille ja amorfisille piikennoille sekä CIGS-kennoille on kehitteillä termisiin menetelmiin perustuva kierrätysteknologia. Prosessin vaiheet ovat alumiinirungon poisto, taustakalvon poisto ja kapselointikalvon polttaminen. Alumiinirunko poistetaan paneelista ilmasylinterin avulla, jonka jälkeen taustakalvon poisto tapahtuu jyrsinkoneella. Alumiinirunko menee kierrätykseen ja taustakalvo hävitetään teollisuusjätteenä. Jäljelle jäänyt osa paneelista kuumennetaan uunissa, jolloin kapselointikalvo hajoaa lämmön vaikutuksesta. Piikennojen tapauksessa kaikki komponentit (lasilevyt, piikennot ja elektrodit) otetaan talteen vasta näiden kolmen vaiheen jälkeen. Jos kyseessä on CIGS-kenno, niin lisäksi suoritetaan CIGS-kerroksen raaputtaminen käyttämällä lankaharjaa, jonka jälkeen metallit saadaan talteen ja ne voidaan edelleen kierrättää metallinkierrätyksessä. Vaikka metallien talteenotto ei varsinaisesti sisälly tähän tekniikkaan, esimerkiksi tehokas hopean talteenotto kennoista on mahdollista lasin ja piikennojen täydellisen erottamisen ansiosta. Tällä menetelmällä voidaan saavuttaa jopa 95 % kierrätysaste ja kapselointikalvon käsittely termisin menetelmin vähentää uunin kuumennukseen vaadittua polttoaineen määrää. Tämä tekniikka toimitettiin edelleen tutkittavaksi vuonna ja tutkimus- ja kehitystyö jatkuu parantaen menetelmää tavoitteenaan kaupallistaa se tulevaisuudessa. (IEA, 2018)

Tällä hetkellä Euroopassa aurinkopaneeleissa olevan lasin kierrätys tapahtuu mekaanisin menetelmin erikseen lasinkierrättäjillä. Siitä huolimatta mekaanisia menetelmiä on jonkin

verran tutkittu ja kehitetty. Piipaneeleille on kehitteillä jauhatustekniikka, joka toteutetaan jäähdytetyissä olosuhteissa. Ensimmäiseksi alumiinikehys ja kytkentärasia poistetaan ja murskataan, jonka jälkeen paneeli jäädytetään -197 celsiusasteeseen käyttämällä nestemäistä typpeä. Jäähdytetty paneeli jauhetaan, ja kapselointikalvon partikkelit, lasi ja sekoittunut metallijauhe, joka sisältää piitä, hopeaa, kuparia ja muita materiaaleja käy läpi fyysisen erottamisprosessin. Ennustettu kierrätysaste on noin 90 %, mutta piitä ei voida kierrättää uudelleen aurinkopaneeliteollisuudelle sen alhaisen puhtauden vuoksi.

Kemiallisia menetelmiä on käytetty jo varhaisessa vaiheessa paneelien kierrätyksessä. Vaikka kapselointikalvon erottaminen laminoidusta rakenteesta onnistuu nykyisillä menetelmillä, vastatoimenpiteet syntyvälle ympäristökuormitukselle koskien kaasumaisia ja nestemäisiä päästöjä ovat välttämättömät ja lisäksi prosessi vie paljon aikaa. Uusia teknologioita on kehitetty parantamaan kyseiset ongelmat. Kapselointikalvon erottamiseen laminoidusta rakenteesta on kehitetty kemiallisiin menetelmiin perustuva prosessi. Ensimmäinen vaihe sisältää alumiinikehyn ja kytkentärasian poistamisen manuaalisesti ja taustakalvon poistamisen mekaanisesti. Seuraavaksi jäljelle jäänyt laminoitu rakenne upotetaan neutraaliin liuottimeen, jolloin lasi, kapselointikalvo, piikennot ja elektrodit erotetaan toisistaan. Erotettu lasi säilyy ehyenä ja se voidaan kierrättää tai käyttää uudestaan. Jäljelle jäänyt laminoitu rakenne murskataan ja upotetaan emäkseen. Tämän jälkeen kapselointikalvo, pii ja elektrodit otetaan talteen. Piihin kiinnittynyt hopea saadaan erotettua lisäprosessien avulla. Prosessi vie paljon aikaa, mutta liuottimet ovat ympäristöystävällisiä verrattuna happoihin ja orgaanisiin liuottimiin. (IEA, 2018)

Euroopan unionin tukema projekti RECLAIM (Reclamation of Gallium, Indium and Rare-earth Elements from Photovoltaics, Solid-State Lighting and Electronic Waste) on kehittänyt viime vuosina menetelmää indiumin ja galliumin talteenotolle CIGS-paneeleista. CIGS-paneelistä ensin poistetaan alumiinikehys, jonka jälkeen paneeli murskataan ja lajitellaan siten, että taustalasi, joka sisältää CIGS-kerroksen ja päällyslasi erotetaan toisistaan. (RECLAIM, 2019) Jäljelle jäänyt taustalasi, joka sisältää CIGS-kerroksen käsitellään kemiallisesti rikkihapolla, jolloin In ja Ga saadaan talteen. Lisäksi metallit In ja Ga puhdistetaan edelleen kemiallisilla prosesseilla. (IEA, 2018)

6 POHDINTA

Ilmastonmuutos on ajanut yhteiskunnan tilanteeseen, jossa ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi on vähennettävä uusiutumattomia energianlähteitä ja korvattava ne kestäväillä energiaratkaisuilla. Kiinnostus aurinkoenergiaan on kasvanut sen puhtauden ja saasteettomuuden vuoksi. Lisäksi EU määräsi uusiutuvan energian direktiivin vuonna (RED II), mikä tehostaa entisestään aurinkopaneelien käyttöönottoa, teknologioiden kehittämistä ja niitä koskevan kiertotalouden parantamista.

Aurinkopaneelien kasvava kysyntä on kasvattanut huolta paneeleissa käytettävien kriittisten materiaalien saatavuudesta. Huolta aiheuttavat kysymykset siitä, että riittävätkö kriittisten aineiden saatavuus vastaamaan kasvavaan kysyntään. Kriittisten aineiden saatavuuteen voidaan vastata kehittämällä kiertotaloutta eli kehittämällä toimivat talteenotto- ja kierrätysteknologiat aurinkopaneeleille. Kriittisten materiaalien saatavuus toissijaisista lähteistä voisi olla tulevaisuudessa mahdollista ja tällä tavalla varmistettaisiin materiaalin säilyminen ja saatavuus Euroopan Unionin alueella. Toisaalta kennoissa esiintyy esimerkiksi myös kadmiumia, mikä tekee aurinkopaneelien kierrätyksestä vaativampaa kadmiumin myrkyllisyyden vuoksi ja väärin kierrätettynä haitat voivat aiheuttaa ympäristövahinkoja. Vaikka aurinkopaneelien käyttö on saasteetonta, paneelin elinkaari pitäisi huomioida kokonaisuudessaan, jotta aurinkoenergiasta saataisiin todellisuudessa puhdasta ja saasteetonta. Lisäksi uusien aurinkokennoteknologioiden kehittäminen on tärkeää, sillä siten voidaan mahdollistaa tulevaisuudessa kustannustehokkaita sekä hyötysuhteeltaan korkeita aurinkopaneeleita, jotka eivät ole riippuvaisia kriittisistä materiaaleista.

Aurinkoenergialla on kasvava rooli hiilineutraalisen yhteiskunnan tavoittelussa. Kehityksen myötä aurinkopaneelien teknologiaa ja loppukäsittelyä parannetaan jatkuvasti muun muassa EU:n tukemilla tutkimushankkeilla. Aurinkosähköstä voi tulla yksi kannattavimmista tavoista tuottaa sähköä. Yhtenä ongelmana tällä hetkellä on säännösten puuttuminen koskien paneelijätettä EU:n ulkopuolella. Euroopassa on määrätty säännökset elektroniikkajätteen kierrätykselle, mutta muualla maailmassa aurinkopaneelijäte päättyy usein teollisuusjätteeksi. Ongelmaan voitaisiin vastata suhtautumalla siihen vakavammin ottamalla mallia EU:n käytännöistä, jolloin voitaisiin maksimoida materiaalien talteenotto sekä kierrätys.

Kehitteillä olevat aurinkokennoteknologiat vaikuttavat lupaavilta vaihtoehdoilta, sillä niissä käytettäviä materiaaleja on runsaasti saatavilla ja ne ovat edullisia. Kennojen valmistusprosessissa voitaisiin jollain tavalla huomioida myös sen kierrätys tulevaisuudessa, mikä saattaisi helpottaa loppukäsittelyä. Kierrätysmenetelmiä kehitetään jatkuvasti ja niissä tulisi huomioida prosessien ympäristöystävällisyys; esimerkiksi liuottimien valinta kemiallisissa menetelmissä. Ympäristön näkökulmasta olisi merkittävää, että aurinkopaneelin koko elinkaari saataisiin mahdollisimman ekologiseksi mutta myös taloudellisesti kannattavaksi.

LÄHDELUETTELO

Ahoranta J., 2019. Aurinkosähköteknologiat. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelm at/aurinkosahkoteknologiat [viitattu 19.9.2019]

Arbouch I., Karzazi Y., & Hammouti B., 2014. Organic Photovoltaic Cells: Operating principles, recent developments and current challenges – Review. Physical and Chemical News 72 (4), 73-84. [viitattu 10.10.2019]

Bleiwas D.I., 2010. Byproduct Mineral Commodities Used for the Production of Photovoltaic Cells. Virginia: U.S. Geological Survey Circular [verkkodokumentti] Saatavissa: <https://pubs.usgs.gov/circ/1365/> [viitattu 19.9.2019]

Direktiivi 2018/2001/EU: Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämisestä, 2018. Euroopan unionin virallinen lehti L328/82, 21.12.2018 Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001&from=en> [viitattu 11.12.2019]

Dittrich T., 2018. Materials Concepts for Solar Cells. London: World Scientific Publishing, 568 s. ISBN: 978-178-63-4448-9 Saatavissa: https://books.google.fi/books?id=_aVQDwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=fi&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false [viitattu 14.10.2019]

Empa (Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology), 2011. CdTe-solar module. Saatavissa: <https://www.empa.ch/web/s604/solarzellen?inheritRedirect=true> [viitattu 18.11.2019]

Energy Sage, 2019. Types of thin film solar panels. [verkkodokumentti] Saatavissa: <https://www.energysage.com/solar/101/about-solar-panels/thin-film-solar-panels-amorphous-cadmium-telluride-and-cigs/> [viitattu 18.9.2019]

EUR-Lex, 2019a. Environment and climate change. [verkkodokumentti] Saatavissa: https://eur-lex.europa.eu/summary/chapter/environment.html?root_default=SUM_1_CODED=20 [viitattu 20.9.2019]

EUR-Lex, 2019b. Energia. [verkkodokumentti] Saatavissa: https://eur-lex.europa.eu/summary/chapter/energy.html?root_default=SUM_1_CODED=18&locale=fi [viitattu 19.9.2019]

Euroopan komissio, 2013. EU ottaa käyttöön väliaikaisen polkumyyntitullin kiinalaisten aurinkopaneelien tuonnissa. [lehistötiedote] Saatavissa: https://europa.eu/rapid/press-release_IP-13-501_fi.htm [viitattu 20.9.2019]

Euroopan komissio, 2018. Commission decides not to extend trade defence measures on solar panels from China. [verkkodokumentti] Saatavissa: <http://trade.ec.europa.eu/doclib/press/index.cfm?id=1904> [viitattu 20.9.2019]

Euroopan komissio, 2019. Renewable Energy. [verkkodokumentti] Saatavissa: https://ec.europa.eu/research/energy/index.cfm?pg=area&areaname=renewable_solar [viitattu 20.9.2019]

Fthenakis V.M. (2000) End-of-life management and recycling of PV modules. Energy Policy, 28, s. 1051-1058. [viitattu 14.10.2019]

Galagan Y. & Fthenakis V. (2012) Organic Photovoltaics: Technologies and manufacturing. Teoksessa: Fthenakis V. (toim.) Third Generation Photovoltaics. Croatia, Intech S. 61-90. Saatavissa: <http://library.umac.mo/ebooks/b28313847.pdf> ISBN 978-953-51-0304-2 [viitattu 21.9.2019]

Hachmann, J., Olivares-Amaya R., Atahan-Evrenk S., Amador-Bedolla C., Sánchez-Carrera R.S., Gold-Parker A., Vogt L., Brockway A.M. & Aspuru-Guzik A., 2011. The Harvard Clean Energy Project: Large-Scale computational screening and design of organic photovoltaics on the world community grid. Journal of Physical Chemistry Letters 2 (17): 2241–2251. Saatavissa: <https://dash.harvard.edu/handle/1/8364968> [viitattu 21.9.2019]

Hösel M., Angmo D., & Krebs F.C., 2013. Organic Solar cells (OSCs). Teoksessa: Ostroverkhova O. (toim.) Handbook of Organic Materials for Optical and (Opto)electronic Devices. S. 473-501. Philadelphia: Woodhead Publishing, ISBN: 978-085-70-9265-6 [viitattu 2.11.2019]

IEA, 2018. End-of-life Management of Photovoltaic Panels: Trends in PV Module Recycling Technologies. Saatavissa: <http://www.iea-pvps.org/index.php?id=459> [viitattu 18.9.2019]

Ilmasto-opas, 2019. Tuuli- ja aurinkoenergia energialähteinä. [verkkodokumentti] Saatavissa: <https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/hillinta/-/artikkeli/83fa215b-3f3d-4b48-9456-ce3a5940e830/tuuli-ja-aurinkoenergia.html> [viitattu 5.9.2019]

ITRPV (International Technology Roadmap for Photovoltaic), 2018. Results 2017 including report 2018. 76 s. [verkkodokumentti] Saatavissa: https://pv.vdma.org/documents/105945/26776337/ITRPV%20Ninth%20Edition%202018%20including%20maturity%20report%2020180904_1536055215523.pdf/a907157c-a241-ee0-310d-fd76f1685b2a [viitattu 18.10.2019]

Irena, 2012. Solar Photovoltaics. Irena working paper, 1 (4-5). [verkkodokumentti] Saatavissa: https://www.irena.org/documentdownloads/publications/re_technologies_cost_analysis-solar_pv.pdf [viitattu 18.9.2019]

IRENA & IEA-PVPS, 2016. End-Of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels. International Renewable Energy Agency and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems, 98 s. [verkkodokumentti] Saatavissa: http://iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/technical/IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf [viitattu 18.9.2019]

Jingbo Z., Yunke L., Guofang Y., Kui J., Haoran L., Harald A., Wei M. & He Y., 2016. Efficient organic solar cells processed from hydrocarbon solvents. Nature Energy, artikkeli nro 15027, DOI: 10.1038/NENERGY.2015.27. [viitattu 28.9.2019]

Kambor S., 2007. 125x125 pseudo-square monocrystalline silicon solar cell, monokristalline Silizium Solarzelle. Saatavissa: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:125x125-pseudo-square-monocrystalline-solar.cell.jpg>

Kekkonen A., 2014. Aurinkopaneelin mekaaninen rakenne. Oulun ammattikorkeakoulu, Aurinkoenergian saatavuus ja aurinkosähköntuotannon taloudellinen kannattavuus Pohjois-Pohjanmaalla -koulutustilaisuudet 24.2.2014 ja 25.2.2014. Saatavissa: https://www.oamk.fi/hankkeet/bioelogia/docs/materiaalit/aur_saataav_0214.pdf

Krueger L., 2009. An overview of First Solar's Module Collection and Recycling Program. Brookhaven National Laboratory (BNL). [Power Point] Saatavissa: https://www.bnl.gov/pv/files/PRS_Agenda/2_Krueger_IEEE-Presentation-Final.pdf [viitattu 14.10.2019]

Käpylehto J., 2016. Auringosta sähköt kotiin, kerrostaloon ja yritykseen. Helsinki: Into Kustannus Oy, 207 s. ISBN: 978-952-26-4528-9

Latunussa C., Mancini L, Blengini G., Ardente F, Pennington D., 2016. Analysis of Material Recovery from Silicon Photovoltaic Panels. [verkkodokumentti]. Luxembourg: Publications Office of the European Union. DOI:10.2788/786252 Saatavissa: <https://pdfs.semanticscholar.org/6b2b/723aa39fe3c257c7a9357c2311411951c6f7.pdf> [viitattu 20.9.2019]

Lehto I., Liuksiala L., Lähde P., Olenius M., Orrberg M., Ylinen M., 2017. Aurinkosähköjärjestelmien suunnittelu ja toteutus. Tampere: Sähköinfo Oy, 136 s. ISBN: 978-952-23-1234-1

Lunardi-Monteiro M., Alvarez-Gaitan J.P., Bilbao J.I., Corkish R., 2018. A Review of Recycling Processes for Photovoltaic Modules. Teoksessa: Beddiah Z. (toim.) Solar Panels and Photovoltaic Materials. London: Intech Open. S. 9-27. ISBN: 978-1-789-23-435-0 Saatavissa: <https://www.intechopen.com/books/solar-panels-and-photovoltaic-materials/a-review-of-recycling-processes-for-photovoltaic-modules#B21> [viitattu 15.9.2019]

Motiva, 2017. Auringosta sähköä. [verkkodokumentti] Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkon_perusteet/auringosta_sahkoa

Motiva, 2019. Aurinkosähköteknologiat. [verkkodokumentti] Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelmat/aurinkosahkoteknologiat [viitattu 10.9.2019]

Mueller K., 2012. Monocrystalline polycrystalline solarcell. Saatavissa: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Monocrystalline_polycrystalline_silicon_solarcell.jpg

Paulescu M., Paulescu E., Gravila P. & Badescu V., 2012. Weather Modeling and Forecasting of PV Systems Operation. London: Springer, 353 s. Saatavissa: https://books.google.fi/books?hl=fi&lr=&id=RZURCrc65loC&oi=fnd&pg=PR7&dq=Weather+Modeling+and+Forecasting+of+PV+Systems+Operation&ots=GFvZnLFQkA&sig=obR_uPbGeVrPTAFtAbprAfBn3lM&redir_esc=y#v=onepage&q=Weather%20Modeling%20and%20Forecasting%20of%20PV%20Systems%20Operation&f=false ISBN: 978-1-4471-4649-0

Pern, J., 2008. Module Encapsulation Materials, Processing and Testing. National Renewable Energy Laboratory (NREL), [Power Point] Saatavissa: <https://www.nrel.gov/docs/fy09osti/44666.pdf>

Phys.org, 2011. Efficiency record for flexible CdTe solar cell due to novel polyimide film. [verkkodokumentti] Saatavissa: <https://phys.org/news/2011-06-efficiency-flexible-cdte-solar-cell.html>

Pyhäranta E., 2019. Oliko aurinkosähköllä aurinkoinen vuosi 2018? Vantaan Energia. [verkkodokumentti] Saatavissa: <https://www.vantaanenergia.fi/oliko-aurinkosahkolla-aurinkoinen-vuosi-2018/> [viitattu 5.9.2019]

Radziemska-Klugmann E., 2012. Current trends in recycling of photovoltaic solar cells and modules. Chemistry-Didactics-Ecology-Metrology, 17 (1-2), S. 89-95. Saatavissa:

<https://content.sciendo.com/view/journals/cdem/17/1-2/article-p89.xml> [viitattu 15.10.2019]

RECLAIM, 2019. Final Report Summary - RECLAIM (Reclamation of Gallium, Indium and Rare-Earth Elements from Photovoltaics, Solid-State Lighting and Electronic Waste). [verkkodokumentti] Saatavissa: <https://cordis.europa.eu/project/rcn/106540/reporting/en> [viitattu 14.10.2019]

Sener C & Fthenakis V, 2014. Energy policy and financing options to achieve solar energy grid penetration targets: Accounting for external costs. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 32, S. 854-868. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032114000410>

Sharma K., Sharma V., Sharma S. S., 2018. Dye-Sensitized Solar Cells: Fundamentals and Current Status. Nanoscale Research Letters, 13 (1). [verkkodokumentti] Saatavissa: <https://nanoscalereslett.springeropen.com/track/pdf/10.1186/s11671-018-2760-6> [viitattu 18.9.2019]

Sitra, 2019. SERRA – Sähkö- ja elektroniikkaromusta raaka-aineita. [verkkodokumentti] Saatavissa: <https://www.sitra.fi/hankkeet/serra-sahko-ja-elektroniikkaromusta-raaka-aineita/> [viitattu 20.9.2019]

Skocaj M., Metka F., Petkovic J. & Novak S., 2011. Titanium dioxide in our everyday life; is it safe? Radiology and Oncology, 45 (4), S. 227-247. Saatavissa: https://content.sciendo.com/view/journals/raon/45/4/article-p227.xml?tab_body=abstract [viitattu 19.9.2019]

Solar Reviews, 2019. Pros and Cons of Monocrystalline vs Polycrystalline solar panels. [verkkodokumentti] Saatavissa: <https://www.solarreviews.com/blog/pros-and-cons-of-monocrystalline-vs-polycrystalline-solar-panels> [viitattu 18.9.2019]

Solar Power World, 2018. What is thin-film solar? [verkkodokumentti] Saatavissa: <https://www.solarpowerworldonline.com/2018/07/thin-film-solar-stuck-in-second-place-even-with-c-si-tariffs/> [viitattu 11.9.2019]

Stephen B., 2014. Solar power: technologies, environmental impacts and future prospects. New York: Nova Science Publisher, 222 s. ISBN 978-163-32-1318-0. [viitattu 5.9.2019]

Suomen Lähienergialiitto ry, 2019. Aurinkoenergia. [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.lahienergia.org/lahienergia/aurinkoenergia/> [viitattu 5.9.2019]

Tekniikka & Talous, Laatikainen Tuula. Aurinkosähkön epäilyttävä alkuperä: Mineraalien louhiminen jättää pahan jäljen – Kanada huolestui vihreästä energiasta. [verkkodokumentti] Saatavissa: <https://www.tekniikkatalous.fi/uutiset/aurinkosahkon-epailyttava-alkupera-mineraalien-louhiminen-jattaa-pahan-jaljen-kanada-huolestui-vihreasta-energiasta/3b401b5e-b42c-3579-a878-a5a2cbd32cd9> [viitattu 19.9.2019]

The Silver Institute, 2019. Silver and Solar Technology. [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.silverinstitute.org/silver-solar-technology/> [viitattu 25.9.2019]

Tekes, 2017. Tulevaisuuden energia 2030...2050. [verkkodokumentti]. Saatavissa: https://tem.fi/documents/1410877/2772829/332_2017_Tulevaisuuden+energia_2030_2050.pdf/4f1c0ec0-58fc-4c1c-9297-7f90ac01615b [viitattu 26.9.2019]

USA Today, 2014. You can't have solar without silver. [verkkodokumentti] Saatavissa: <https://eu.usatoday.com/story/money/markets/2014/08/29/no-silver-no-solar/14756397/>

Vattenfall, 2019. Aurinkovoima [verkkodokumentti] Saatavissa: <https://www.vattenfall.fi/sahkosopimukset/tuotantomuodot/aurinkovoima/> [viitattu 5.9.2019]

VTT, 2014. Kriittiset metallit vihreässä energiateknologiassa. [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2014/T162.pdf>

VTT, 2015. Kuvioidut, taipuisat aurinkopaneelit osaksi sisustusta ja esineiden ulkonäköä. Saatavissa: <https://www.vtt.fi/medialle/uutiset/kuvioidut-taipuisat-aurinkopaneelit-osaksi-sisustusta-ja-esineiden-ulkon%C3%A4k%C3%B6%C3%A4>